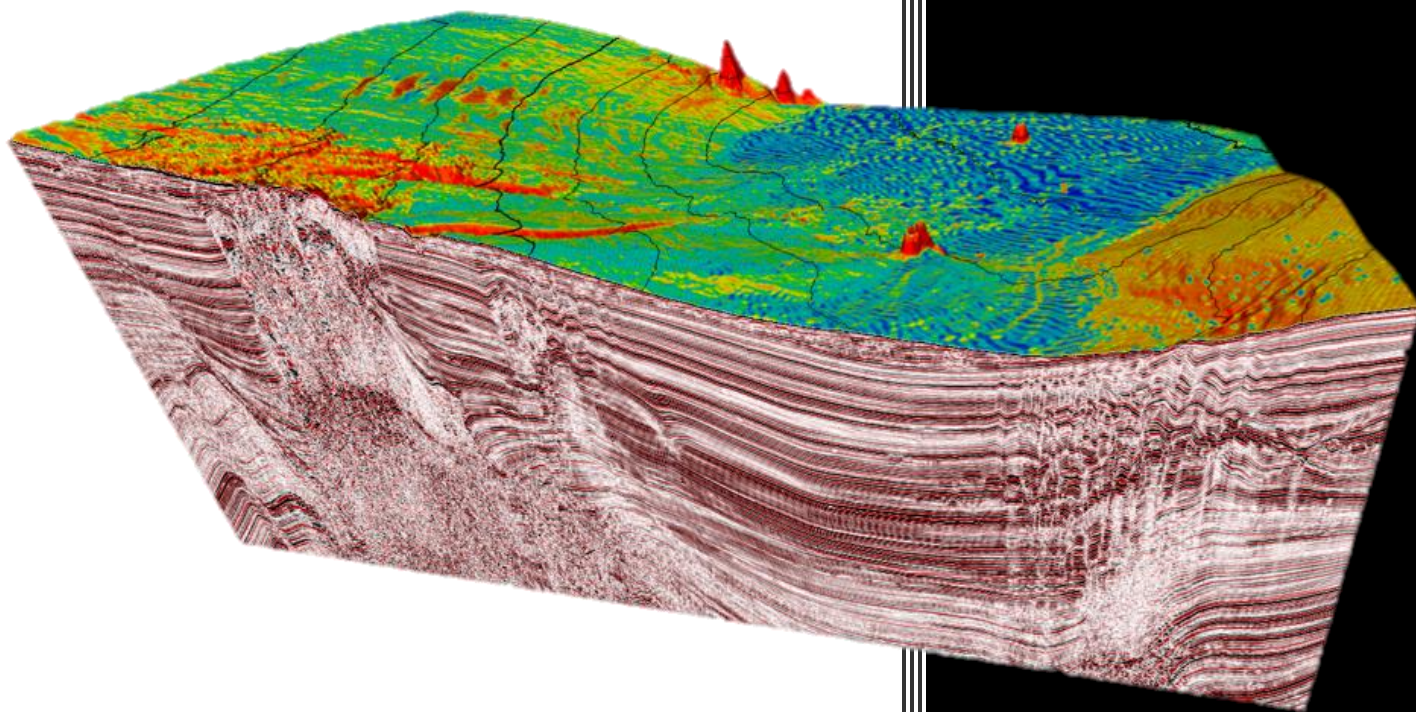


**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE CUERPOS SEDIMENTARIOS
CUATERNARIOS EN CUENCA BAHÍA, OFFSHORE (COLOMBIA)**



Melissa López Vanegas
Universidad del Norte
26/05/2020

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE CUERPOS SEDIMENTARIOS CUATERNARIOS EN CUENCA BAHÍA, OFFSHORE (COLOMBIA)

Melissa Paola López Vanegas

Trabajo de Grado para optar al título de geólogo

Carolina Martínez Mendoza

Daniel Bello Palacios



Universidad del Norte
Departamento de Física y Geociencias
Barranquilla
2020

*A familia,
que con su apoyo y esfuerzo
me han permitido alcanzar todos mis objetivos.*

AGRADECIMIENTOS

A mis directores Carolina Martínez y Daniel Bello por ser mi guía durante la elaboración de este trabajo. Por su dedicación, paciencia y apoyo en todo momento.

Al profesor Oscar Álvarez, por su apoyo constante con las revisiones y correcciones durante la realización de este trabajo.

A la Gerencia de Exploración Offshore de ECOPETROL S.A., por proporcionar los datos utilizados para este trabajo.

A los profesores del departamento de Física y Geociencias, por el acompañamiento y el apoyo integral en mi paso por Uninorte.

A los amigos con los que compartí a lo largo de esta carrera, especialmente a Carlos Ortiz por su paciencia para explicarme las cosas.

Gracias a todos lo que directa o indirectamente me ayudaron a la realización de este trabajo 😊❤️.

ABSTRACT

The rise of the energy resources exploration and exploitation in deep-waters environments requires a deeper knowledge on potential marine geohazards that may be present. Quantifying geohazards and mitigating their risk needs the geological seafloor characterization and the factors triggering their activation. This study is based on the combination of 3D seismic information and geographic information systems for the susceptibility assessment and predisposition to marine geohazards in the seismic volume of the Bahía sub-basin, located in northern Colombia. The study area is recognized as a geologically active area with a large contribution of continental sediments, due to its proximity to the mouth of the Magdalena River. Through the creation of geological maps based on the interpretation of seismic data, sedimentological processes and geoforms could be identified which could be associated with submarine landslides. A multi-criteria map involving three main factors (proximity to faults, presence of diapirs and slope gradients) is created to identify underwater landslides prone areas. Briefly, the results show that this area presents low susceptibility to landslide occurrence, although there are three areas with medium to high submarine landslide susceptibility: the first area, linked to the presence of diapirs, the second area related to proximity to faults and the third one involving high slopes, presence of diapirism and faults. This methodology provides useful information for the risk mitigation when defining the location of potential drillsites, deployment of infrastructure and pipelines, in addition to land use planning. This tool is easy to implement and useful for kicking off a risk assessment.

RESUMEN

El auge de la exploración y explotación de recursos energéticos en ambientes de aguas profundas demanda un conocimiento más completo de las amenazas marinas que pueden estar presentes. El primer paso para cuantificar las amenazas y mitigar el riesgo de estas es la caracterización geológica del fondo marino y los procesos asociados con inestabilidades submarinas y mecanismos de activación. El trabajo realizado se basa en la combinación de información de sísmica 3D y sistemas de información geográfica para la evaluación de la susceptibilidad y predisposición a geoamenazas marinas en el volumen sísmico de la cuenca Bahía, ubicado en el norte colombiano. El área de estudio se caracteriza por ser una zona geológicamente activa y con un importante aporte de sedimentos continentales, debido a su cercanía con la desembocadura del Río Magdalena. A través de la creación de mapas geológicos basados en la interpretación de datos sísmicos se pudieron identificar procesos sedimentológicos y caracterizar las geoformas en el área que pueden estar asociadas a deslizamientos submarinos. A partir de esta caracterización, se crea un mapa multicriterio que involucra tres factores principales (cercanía a fallas, presencia de diapiros y pendiente) para identificar zonas propensas a la ocurrencia de deslizamientos submarinos. De manera general, el área de estudio presenta baja susceptibilidad a deslizamientos, aunque se reconocieron tres áreas con susceptibilidad de moderada a alta. El primero, ligado a la presencia de diapiros, el segundo relacionado con la cercanía a fallas y el tercero que involucra altas pendientes, presencia de diapirismo y fallas. Esta metodología proporciona información útil para la mitigación de riesgos en la selección de posibles sitios de perforación, sitios de construcción en aguas profundas o tuberías, además para el desarrollo de planes de ordenamiento territorial. Es una herramienta fácil de aplicar y útil para dar el primer paso en la evaluación de riesgos.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
2. MARCO GEOLÓGICO.....	5
2.1. GEOLOGÍA REGIONAL	5
2.2. CONTEXTO TECTÓNICO Y ESTRUCTURAL.....	6
2.3. ESTRATIGRAFÍA	7
3. METODOLOGÍA	9
3.1. BASE DE DATOS.....	9
3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS	10
4. RESULTADOS.....	13
4.1. INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE DATOS SÍSMICOS	13
4.1.1. Morfología del fondo marino	16
4.1.2. Cuaternario	19
4.2. DESLIZAMIENTOS SUBMARINOS	25
4.3. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.....	25
4.3.1. Análisis de la pendiente.....	25
4.3.2. Presencia de diapiros	27
4.3.3. Cercanía a fallas	27
5. DISCUSIÓN	30
6. CONCLUSIONES	32
7. REFERENCIAS.....	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. El área de estudio se encuentra demarcada en rojo y los límites de las cuencas sedimentarias en naranja.	2
Figura 2. Mapa que muestra los principales dominios geomorfológicos y sistemas de fallas regionales. El polígono rojo muestra el área de estudio.	6
Figura 3. Representación estratigráfica de las principales cuencas del norte de Colombia y de cuenca Bahía. Tomado de Sarmiento (2019).	8
Figura 4. Calidad de la imagen sísmica del volumen sísmico Bahía 3D, se pueden apreciar volcanes de lodos distinguibles por áreas borrosas en la imagen	9
Figura 5. Modelo de velocidades. A) Modelo por zonas; B) Modelo por capas; C) Modelo de velocidades interválicas; D) Modelo de velocidades promedio.	11
Figura 6. Esquema del flujo de trabajo considerado para realizar el proyecto.	12
Figura 7. Xline 1148, mostrando las diferentes facies sísmicas identificadas en la unidad de estudio. A) Facies con reflectores caóticos; B) Facies con reflectores horizontales, paralelos a subparalelos; C) Facies con reflectores horizontales de baja continuidad; D) Reflectores con terminación onlap.	14
Figura 8. Mapa de estructuras principales de la cuenca Bahía. Modificado de Galindo (2016) ..	15
Figura 9. Superficie interpretada del fondo oceánico y las geoformas identificadas. A) Canal en el NW de la cuenca en dirección NE; B) Serie de canales en el SW de la cuenca en dirección NE; C) Volcán de lodo con forma elongada ubicado en el este de la cuenca; D) Volcán de lodo de forma cónica localizado en NE; E) Serie de volcanes de lodo con forma piramidal ubicados en el NE de la cuenca; F) Volcanes de lodo localizados en el NW de la cuenca.	17
Figura 10. Superficie interpretada de la base del Cuaternario y las geoformas identificadas. A) Serie de paleocanales en dirección SE-NW; B) Paleocanales en dirección SE-NW; C) Paleocanal en dirección SE-NW; D) Diapirismo de lodo en la base de la secuencia del Cuaternario.	20
Figura 11. Mapa de espesor de la secuencia del Cuaternario (los colores rojizos son las áreas de mayor espesor) y los depocentros principales identificados en la cuenca Bahía.	21
Figura 12. Sección sísmica SW-NE indicando los depocentros A y B y las estructuras principales (diapiros y fallas normales). Se puede notar como los depocentros parecen estar controlados por estructuras preexistentes, como el anticlinal ubicado en el SE de la línea sísmica.	22
Figura 13. Sección sísmica SW-NE indicando los depocentros C y las estructuras principales (volcanes de lodo, fallas normales y de colapso gravitacional y paleocanales). Se puede notar como los depocentros parecen estar controlados por estructuras preexistentes	23

Figura 14. Mapa de pendientes. Se observa que el área de estudio tiene pendientes principalmente entre 0° y 2° y presenta cambios abruptos en zonas cercanas a volcanes de lodo y canales.....	26
Figura 15. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos submarinos. Se aprecia que la mayor parte del área (colores azules) posee una muy baja susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos.....	28

1. INTRODUCCIÓN

La zona de estudio está localizada en la costa norte de Colombia frente a las ciudades de Barranquilla y Santa Marta, específicamente en la cuenca Sinú Offshore de acuerdo con la clasificación oficial de cuencas de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (Figura 1) (Barrero et al., 2007). Desde el punto de vista geológico, el área hace parte del Cinturón Deformado del Caribe Sur producto de la subducción de la Placa Caribe bajo la Placa Suramericana (Cediel et al., 2003). Además, la zona de estudio se encuentra adyacente a la desembocadura del Río Magdalena que controla el aporte sedimentario de la región, con un aproximado de $142,6 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ de sedimentos en suspensión y a una velocidad de descarga de $7200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Restrepo et al. 2017). Por otro lado, los deslizamientos submarinos suelen estar asociados a la rápida acumulación de sedimentos, aumento de pendiente, exceso de presión en los poros de los sedimentos, diapirismo, tectónica, terremotos, variaciones eustáticas del nivel del mar, disociación de hidratos de gas y actividad humana (Hampton et al., 1996). Es así como el área de estudio se convierte en una zona con alto potencial para la ocurrencia de deslizamientos de tierra que pueden derivar en desastres naturales en la costa. Este tipo de eventos puede ocasionar un impacto negativo para el desarrollo de prospectos exploratorios en la industria de hidrocarburos, así como para el desarrollo social de las comunidades aledañas a las zonas de influencia.

Este trabajo muestra la aplicabilidad de los datos sísmicos 3D para analizar geometrías de cuerpos geológicos y su arquitectura interna en la caracterización

geomorfológica del fondo marino en el área de estudio para finalmente identificar geoformas que puedan ser causantes de potenciales geoamenazas.

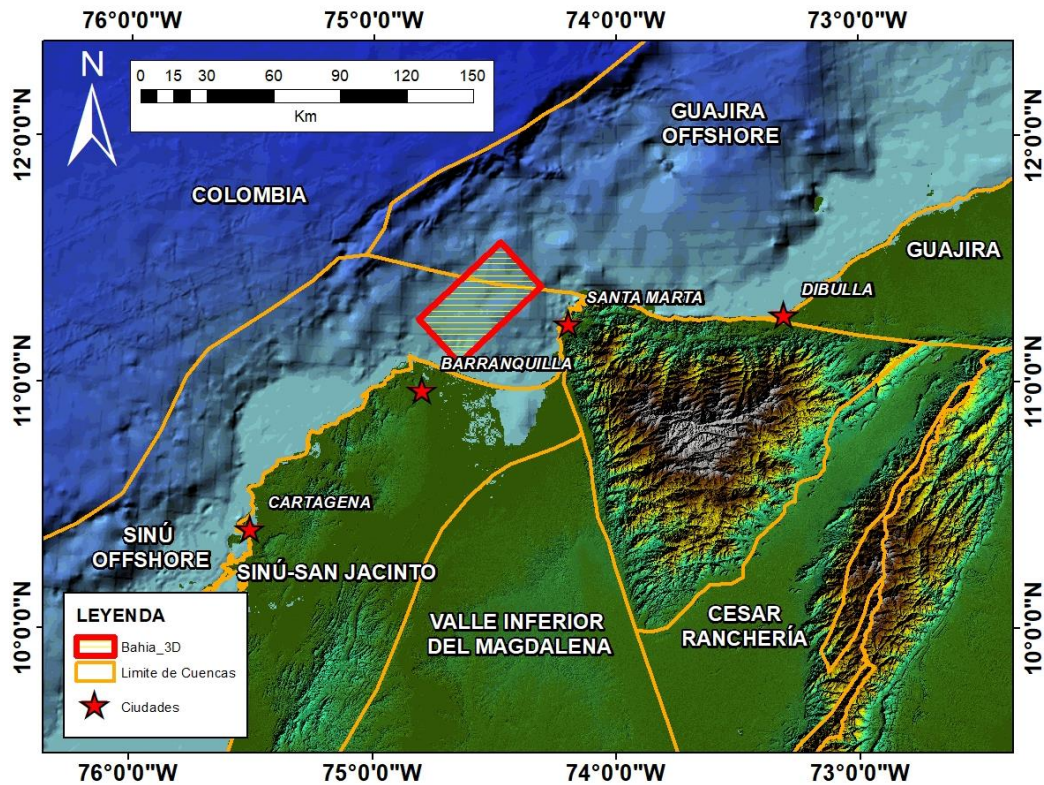


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. El área de estudio se encuentra demarcada en rojo y los límites de las cuencas sedimentarias en naranja.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El interés por el estudio y caracterización del fondo marino ha aumentado notoriamente en las últimas décadas dado que son esenciales en la identificación de posibles geoamenazas para la infraestructura marina y costera (Ratzov et al., 2009). Adicionalmente, son fundamentales para entender las condiciones oceanográficas, los impactos del aumento del nivel del mar, los efectos del cambio climático en los

ecosistemas marinos y mejores enfoques para la identificación de riesgos asociados a estos (Yonggang et al., 2016) Por otro lado, conociendo que el área de estudio se encuentra en una zona geológicamente activa, con gran cantidad de fluidos en el subsuelo y además recibe grandes aportes sedimentarios del continente (Vinnels et al., 2010), se podría inferir que el área de estudio presenta la mayoría de los elementos necesarios para la generación de deslizamientos submarinos. Estos eventos representan una amenaza en las obras de infraestructura marino-costera o en la explotación de hidrocarburos.

Asimismo, las ciudades costeras están expuestas a riesgos de inundaciones o tsunamis si los deslizamientos son lo suficientemente grandes (McAdoo y Watts, 2004).

Adicionalmente, en el Caribe Colombiano no hay un amplio conocimiento de los factores y mecanismo generadores de deslizamientos, por lo que se hace necesario realizar caracterizaciones geomorfológicas de los sedimentos recientes, en este caso del Cuaternario (~ 2.58 Ma) y de los procesos asociados con las inestabilidades submarinas y sus factores de activación, como primer paso para cuantificar las amenazas y mitigar el riesgo.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Realizar la caracterización geomorfológica de los depósitos sedimentarios cuaternarios en el volumen sísmico Bahía 3D con el fin de identificar geoformas y procesos relacionados a potenciales geoamenazas

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar y describir los procesos sedimentológicos y geoformas presentes en los depósitos sedimentarios cuaternarios en el bloque bloque Bahía 3D a partir de datos sísmicos.
- Establecer patrones de respuesta sísmica (facies sísmicas) que permitan diferenciar los diferentes tipos de depósitos dentro del volumen sísmico a partir de cálculos de atributos (ganancia, varianza y ant-tracking).
- Identificar en el subsuelo geoformas relacionadas con potenciales geoamenazas a la infraestructura marino-costera y comunidades aledañas.

2. MARCO GEOLÓGICO

La cuenca de Bahía está localizada en la esquina NW de Suramérica, en el Cinturón Deformado Caribe Sur, en lo que constituye la zona de convergencia entre las placas Caribe y Suramericana. El estilo estructural del área es resultado de una compleja historia de subducción, acreción y transpresión que está en curso desde el Cretácico (Pindell & Kennan, 2009; Galindo, 2017).

2.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El margen continental activo del norte de Colombia ha estado controlado por las interacciones entre las placas del Caribe y Suramericana (Cadena et al., 2015). La configuración estructural de esta zona inicia en el Cretácico Tardío con la colisión de la placa Caribe con la zona noreste de la placa Suramericana y posteriormente con el cambio de dirección hacia el este en el movimiento de la placa Caribe y el inicio de la subducción oblicua desde el Mioceno Temprano lo que genera un estilo transpresivo en el área de estudio (Cediel et al., 2003). Por otro lado, la colisión de estas dos placas también es causante de la configuración del Cinturón Deformado del Caribe Sur, donde la convergencia de ~20 mm/año se acomoda a lo largo de la costa Caribe colombiana en forma de una secuencia sedimentaria de hasta 12 km de espesor altamente deformada (Toto & Kellogg, 1998).

2.2. CONTEXTO TECTÓNICO Y ESTRUCTURAL

La cuenca Bahía se encuentra rodeada por el cinturón deformado del Caribe Sur, los cinturones plegados de Sinú y San Jacinto, el abanico submarino del Magdalena, la cuenca del valle inferior del Magdalena y la Sierra Nevada de Santa Marta (Figura 2). Asimismo, la zona de estudio se encuentra justo en frente de la de la continuación costa afuera (offshore) de los sistemas de fallas de Santa Marta-Bucaramanga y Oca (Sarmiento, 2019). De acuerdo con trabajos realizados por Hernández y Guerrero (2006) y Duarte (2009) es probable que estos sistemas de fallas controlen significativamente el estilo transpresional y la evolución de la cuenca (Galindo, 2015).

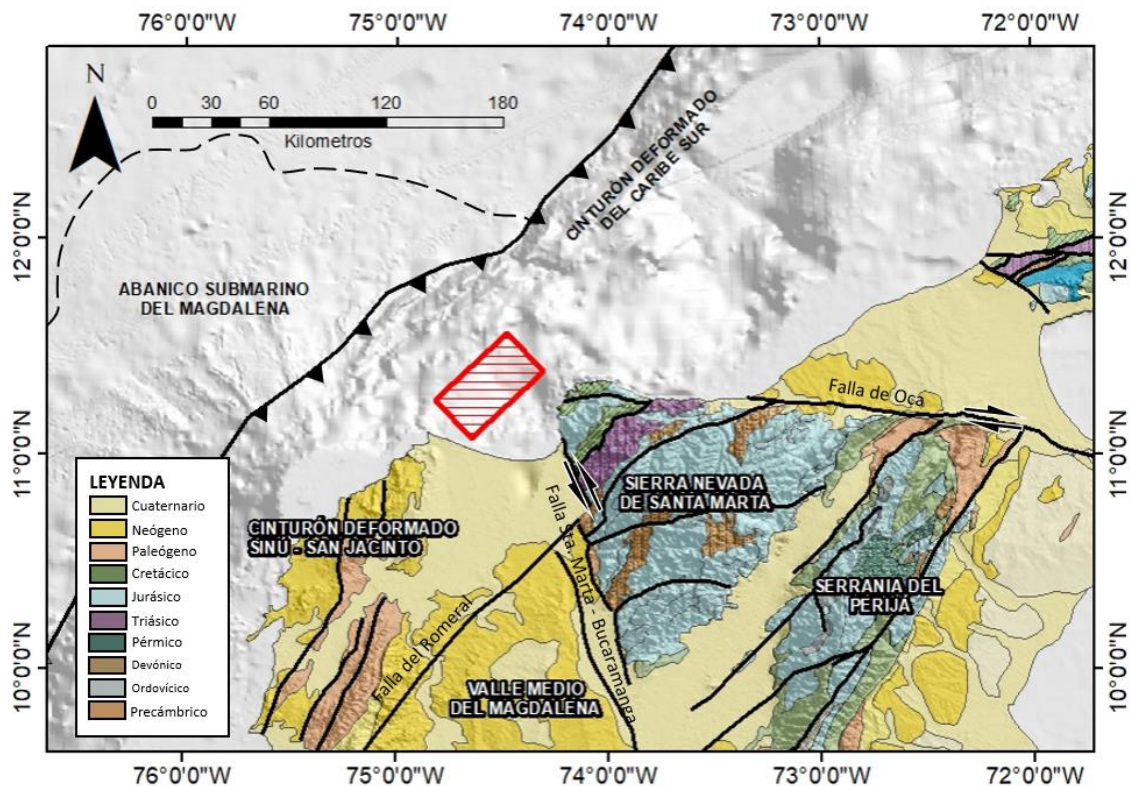


Figura 2. Mapa que muestra los principales dominios geomorfológicos y sistemas de fallas regionales. El polígono rojo muestra el área de estudio.

Por otro lado, la evolución tectónica de la cuenca se divide en tres eventos principales: contracción, transtensión y finalmente transpresión e inversión. La primera fase de contracción es definida por la deformación evidenciada por fallas de cabalgamiento y pliegues orientados SW-NE desde el Eoceno al Eoceno Medio, dado que es relacionada con la acreción del cinturón deformado Sinú-San Jacinto. Posteriormente, empieza una fase de transtensión debido al cambio de dirección de la placa Caribe en el Mioceno Temprano que ocasiona una apertura y llenado de la cuenca. Finalmente, en el Plioceno se da el mayor desplazamiento de la cuenca de Bahía, comprimiendo la parte norte del área (Sarmiento, 2019).

2.3. ESTRATIGRAFÍA

El área de estudio ha estado fuertemente influenciada por sedimentos provenientes del río Magdalena desde el Neógeno. El abanico submarino del Magdalena cubre un área de aproximadamente 237,000 km² y alcanza profundidades mayores a los 4250 m. Asimismo, el abanico submarino del Magdalena ocupa la mayor parte de la cuenca de Colombia e incluso alcanza la parte inferior del promontorio de Nicaragua (*Lower Nicaragua Rise (LNR)*) (Idárraga-García et al., 2019).

El abanico submarino del Magdalena ha experimentado varias migraciones y una progradación constante a través del tiempo (Pince et al., 2003). El proto-Magdalena se desarrolló inicialmente en la región de Maracaibo durante el Paleógeno tardío (Guerrero, 1993). Posteriormente, en el Mioceno el inicio del levantamiento de la cordillera oriental generó un flujo hacia el norte y noreste del sistema fluvial (Hoorn et al., 1995). La

entrada más alta de sedimentos del río Magdalena hacia la cuenca Bahía fue durante el Pleistoceno (Romero et al., 2015). En la Figura 3 se muestra la estratigrafía de las principales cuencas sedimentarias del Caribe colombiano, incluyendo el área de estudio. Se observa que en las cuencas Urabá, San Jacinto y San Jorge aparecen unidades de conglomerados en el Pleistoceno, lo que apoya la entrada de sedimentos de alta energía del río Magdalena a dichas cuencas. Mientras que en el área de estudio se observa una secuencia de lodo que puede representar una entrada distal del río en ese momento (Sarmiento, 2019).

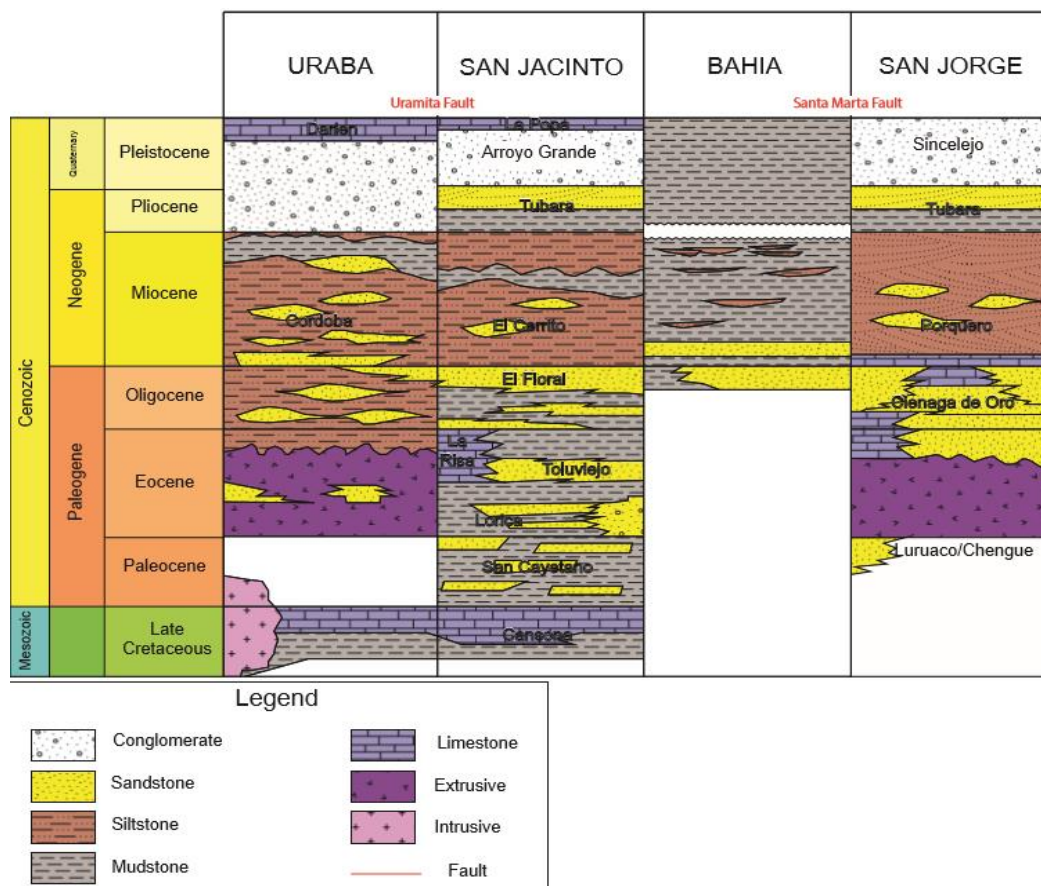


Figura 3. Representación estratigráfica de las principales cuencas del norte de Colombia y de cuenca Bahía. Tomado de Sarmiento (2019).

3. METODOLOGÍA

3.1. BASE DE DATOS

Los datos utilizados en este estudio consisten en información bibliográfica de estudios petroleros, tectónicos y estructurales realizados en el área, una batimetría regional obtenida de GEBCO con una resolución de ~462 m y un volumen sísmico proporcionado por la Gerencia de Exploración Offshore de ECOPETROL S.A., este volumen cubre un área de 1400 km², con una resolución lateral de 25 m X 12.5 m y una resolución vertical de 4 ms (~12 m). La calidad de la sísmica es buena con alta resolución al menos en el área de estudio que es la zona más somera. Sin embargo, la presencia de volcanes y fluidos de lodo afecta la imagen sísmica (Figura 4).

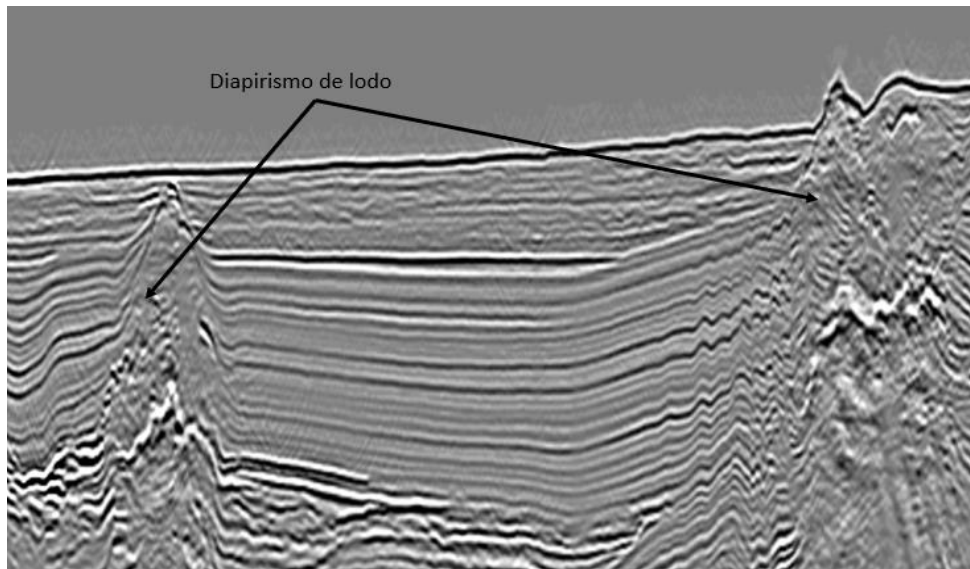


Figura 4. Calidad de la imagen sísmica del volumen sísmico Bahía 3D, se pueden apreciar volcanes de lodos distinguibles por áreas borrosas en la imagen

3.2.PROCESAMIENTO DE DATOS

La metodología está basada en un flujo de trabajo que parte de integrar toda la información disponible en el área para incluirla dentro de un ambiente tridimensional. La herramienta de trabajo para el tratamiento, visualización, procesamiento e interpretación de los datos sísmicos fue Petrel®.

El procesamiento de la información de entrada consistió en interpretar los horizontes de mayor relevancia en el volumen sísmico como la batimetría y las principales interfases sedimentarias. A partir esta interpretación se describen las facies sedimentarias presentes en la secuencia del Cuaternario y su relación con el fondo marino. Además, se utilizan atributos sísmicos con el objetivo de mejorar la imagen y diferenciar la distribución de facies sísmicas, con esto se puede correlacionar la imagen con los diferentes tipos de depósitos. Los atributos sísmicos usados fueron AGC (control de ganancia automático), filtrado de frecuencias y varianza y ant-tracking para definir los principales rasgos estructurales

Por otro lado, dado que la información sísmica se encuentra disponible en el dominio de tiempo (tiempo doble o TWT), es necesario convertir dicha información al dominio de profundidad para unificar escalas por medio de un modelo de velocidades. A partir de la información de registros de pozos (*CheckShot*) cercanos o dentro del área de estudio es posible construir el modelo de velocidades, que permite la conversión de los datos a profundidad. Usualmente en los flujos de trabajo petrotécnicos se usa la metodología “*Layer Cake*”, que consiste en ir propagando por medio de extrapolación la

velocidad intervállica (VINT) de las diferentes interfases geológicas (incluyendo la columna de agua), desde uno o varios pozos a todo el volumen de interés a lo largo de las capas modeladas. Una vez propagada la velocidad intervállica es necesario calcular un volumen de velocidad promedio (VAVG), el cual se utilizará para convertir directamente cualquier elemento a profundidad que se encuentre dentro del volumen incluyendo horizontes, superficies y sísmica (Figura 5).

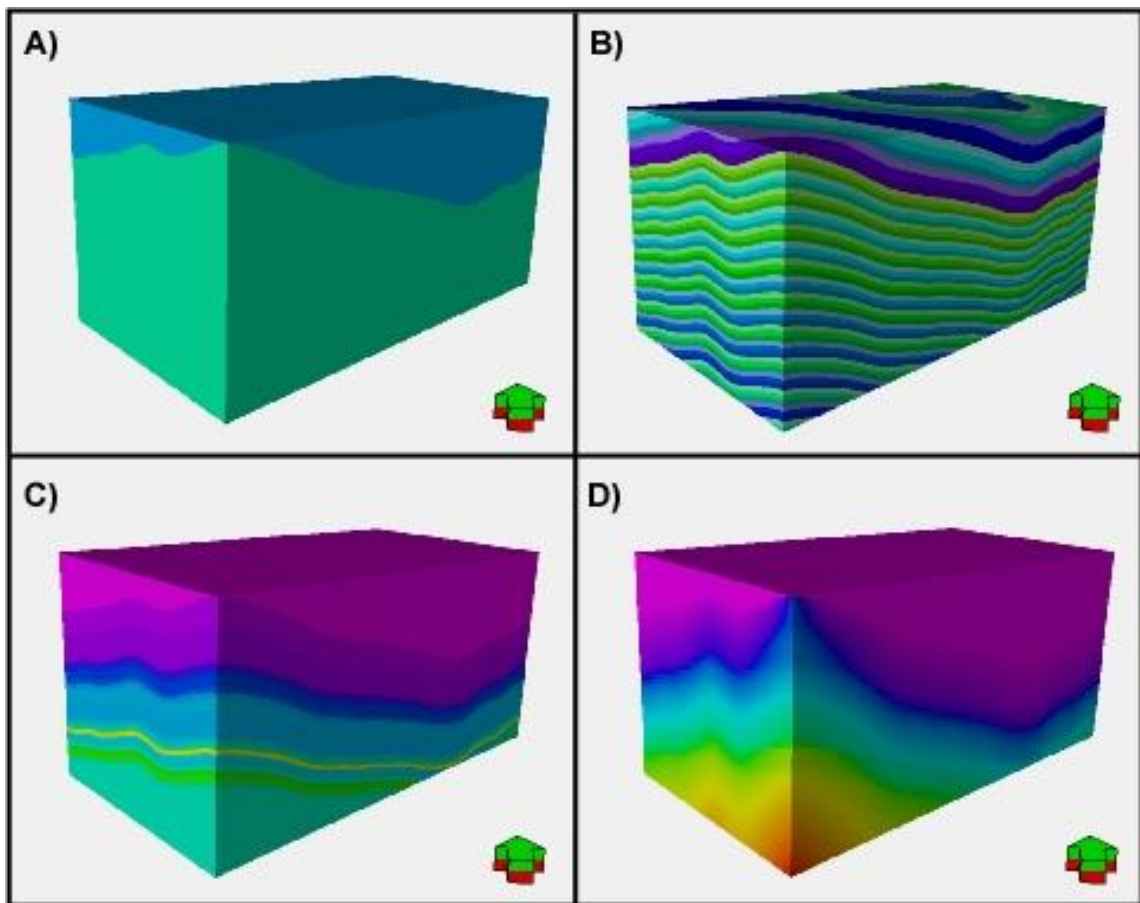


Figura 5. Modelo de velocidades. A) Modelo por zonas; B) Modelo por capas; C) Modelo de velocidades intervállicas; D) Modelo de velocidades promedio.

Una vez se obtenida la información en profundidad se ajusta la interpretación, se analizan y clasifican los datos de acuerdo con la geometría de los depósitos para explicar los procesos sedimentarios. Finalmente, se caracteriza la morfología del fondo marino y las posibles geoamenazas identificadas en el área de estudio. La Figura 6 muestra un resumen de la metodología explicada anteriormente



Figura 6. Esquema del flujo de trabajo considerado para realizar el proyecto.

4. RESULTADOS

La unidad a estudiar comprende los depósitos sedimentarios localizados en la base del Cuaternario (~ 2.58 Ma) hasta la batimetría actual. En los datos sísmicos, el fondo marino corresponde al primer reflector el cual marca un aumento significativo en la impedancia acústica. La base del Cuaternario ha sido determinada teniendo en cuenta trabajos realizados anteriormente en la zona (Espitia, 2016; Galindo, 2016; Sarmiento, 2019).

4.1.INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE DATOS SÍSMICOS

De manera general, los reflectores que representan los depósitos sedimentarios del Cuaternario son distinguibles en cuatro facies sísmicas. La primera facies, ubicada en la base de la secuencia exhibe reflectores continuos, de paralelos a subparalelos de alta amplitud y frecuencia e indica una tasa de depositación constante y uniforme (Figura 7B). En segundo lugar, justo debajo del fondo marino actual se observan reflectores de menor intensidad, semitransparentes de poca continuidad lateral, posiblemente estén asociadas a flujo de masa, por corrientes turbidíticas u otros MTD's (*Mass-transport deposits*) (Figura 7C). La tercera facies, comprende reflectores caóticos, discontinuos de moderado a alto contraste de amplitudes, aparecen como perturbaciones verticales de forma cilíndricas, estos se concentran principalmente al noroeste del volumen sísmico (Figura 7A). Finalmente, en la base de la secuencia encontramos rellenos de canales caracterizados por presentar reflectores ondulosos, bien definidos y algunos de estos

pueden presentar terminación onlap, la mayoría de estos canales se encuentran ubicados sureste del área de estudio (Figura 7D).

Los pliegues de baja amplitud con tendencia de NS y NE están concentrados en áreas con pendientes altas, mientras que fallas normales afectan la secuencia en el suroeste.

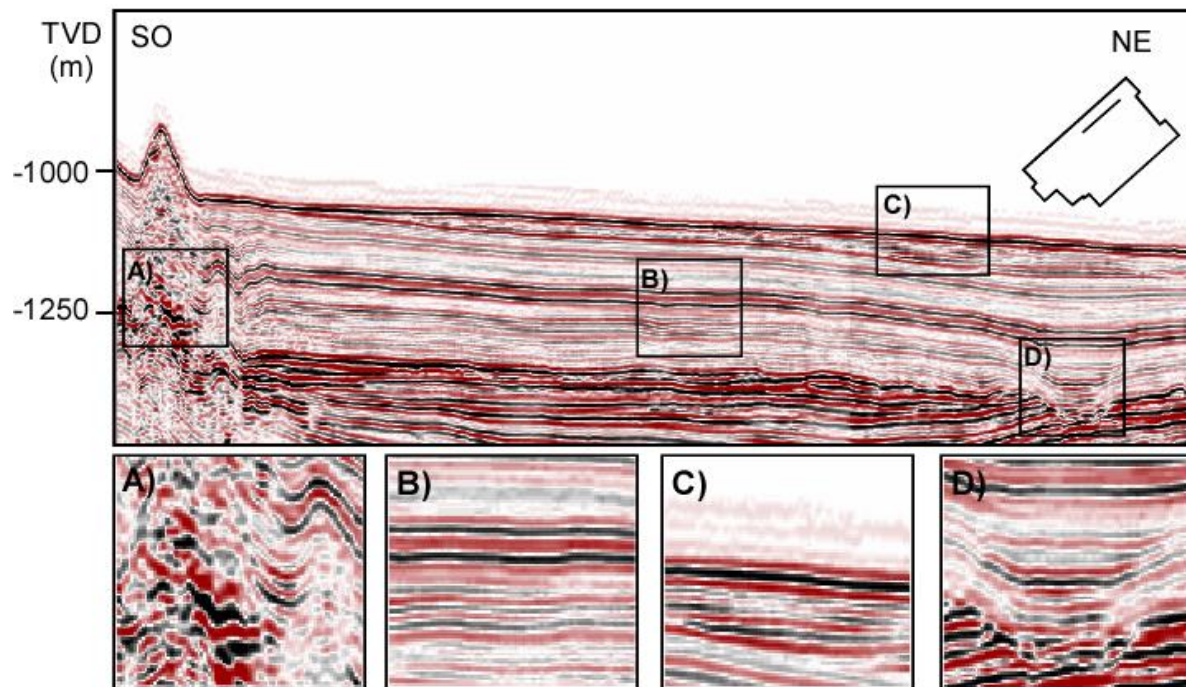


Figura 7. Xline 1148, mostrando las diferentes facies sísmicas identificadas en la unidad de estudio.

A) Facies con reflectores caóticos; B) Facies con reflectores horizontales, paralelos a subparalelos; C) Facies con reflectores horizontales de baja continuidad; D) Reflectores con terminación onlap.

Por otro lado, estudios recientes han determinado que la cuenca de Bahía presenta 4 fallas principales (Figura 8). La falla A con tendencia NE-SW con 70 km de longitud y forma el límite noroeste de la cuenca de Bahía, esta falla no presenta evidencia en la batimetría, lo que significa que no hay actividad reciente a lo largo de esta zona de

falla. Por otro lado, la falla C, es una falla lateral derecha con movimiento normal, tiene tendencia E-W ubicada en el límite sur de la cuenca de Bahía y tiene aproximadamente 60 km de longitud desde la intersección con la falla A en el oeste hasta el truncamiento con la falla D hacia el este. Adicionalmente, el área de estudio presenta una falla que divide a esta en dos partes (Falla B), que corresponde a una falla lateral derecha con movimiento normal que se extiende por toda el área y una longitud de aproximadamente 45 km. Finalmente, al noreste de cuenca se encuentra la falla D, que es una es una falla lateral izquierda con movimiento inverso, con dirección N-S que de aproximadamente 12 km de longitud en el área de estudio y puede continuar hacia el sur (Espitia, 2016; Galindo, 2016; Sarmiento, 2019).

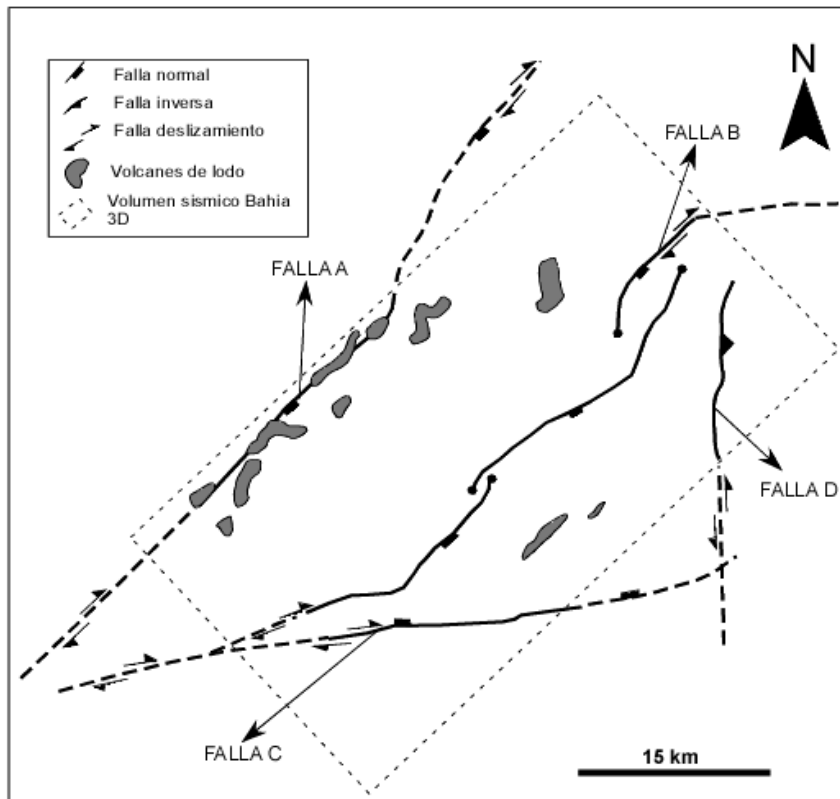


Figura 8. Mapa de estructuras principales de la cuenca Bahía. Modificado de Galindo (2016)

4.1.1. Morfología del fondo marino

El mapa del fondo marino obtenido después del procesamiento y análisis de las líneas sísmicas (Figura 9), muestra que el área de estudio se encuentra en el talud continental superior a profundidades entre 250 m en la esquina suroeste y 1320 m en la esquina noreste del volumen sísmico.

La superficie muestra una morfología variada influenciada por procesos asociados con el abanico submarino del Magdalena, incluidos los canales y cañones submarinos que transportan sedimentos desde la plataforma a las cuencas situadas entre los altos estructurales (Romero et al., 2010) debido a que presenta un sistema de drenaje que fluye en dirección SW al NE desde la parte más alta de la cuenca. El desarrollo y la evolución de este sistema de cañones ha sido controlado por la presencia de altos estructurales relacionados con el cinturón deformado del sur del Caribe. Estas altos estructurales alcanzan alturas de ~ 320 m sobre el fondo marino circundante y actúan como barreras que controlan el camino de los cañones. Los canales identificados son producto de flujos turbidíticos y presentan formas sinuosas con longitudes que varían entre 13 y 26 km (Figura 9A, 9B).

La superficie se ve afectada por la presencia de volcanes de lodo que afloran en el fondo marino en el sector noreste de la cuenca (Figura 9C, 9D, 9E, 9F), estos presentan formas cónicas y piramidales elongadas con un diámetro aproximado de 1.5 km y presentan pendientes de hasta 30°, mostrando además deformación de los sedimentos aledaños a estos y los cuales son fácilmente distinguibles en los reflectores sísmicos.

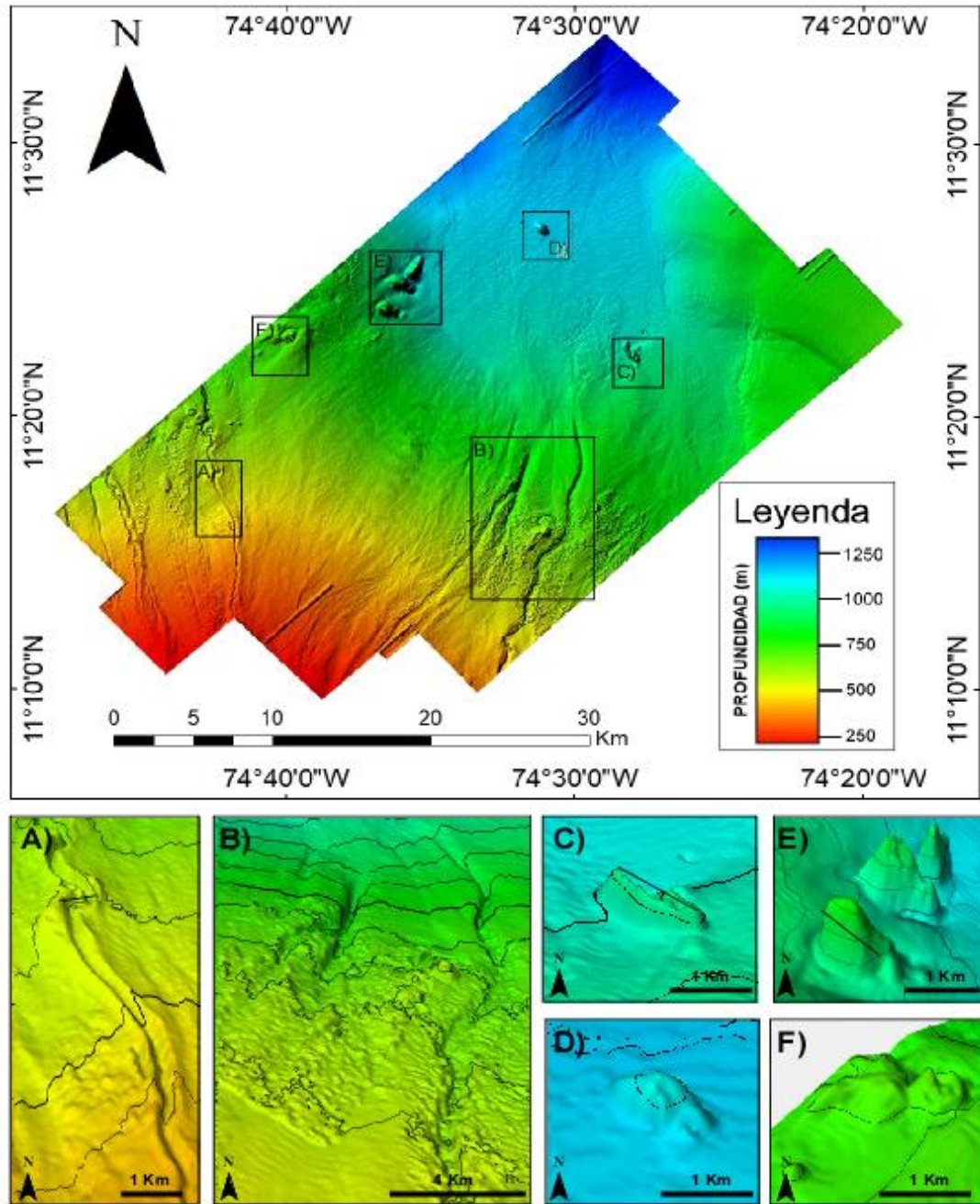


Figura 9. Superficie interpretada del fondo oceánico y las geoformas identificadas. A) Canal en el NW de la cuenca en dirección NE; B) Serie de canales en el SW de la cuenca en dirección NE; C) Volcán de lodo con forma elongada ubicado en el este de la cuenca; D) Volcán de lodo de forma cónica localizado en NE; E) Serie de volcanes de lodo con forma piramidal ubicados en el NE de la cuenca; F) Volcanes de lodo localizados en el NW de la cuenca.

Hacia el suroeste de la cuenca, la plataforma se encuentra afectada por la progradación reciente del abanico submarino del Magdalena, sobre la extensión submarina del Cinturón Deformado del Caribe Sur

Al este, la cuenca está siendo controlada un por la falla D que tiene dirección N-S que eleva la batimetría en esta zona. El área de estudio presenta pendientes suaves, entre 0° a 2° en su mayoría, aunque áreas cercanas a fallas, pliegues y volcanes de lodo evidencian cambios abruptos de pendientes que pueden llegar hasta los 30°.

4.1.2. Cuaternario

El mapa de la base del Cuaternario obtenido después del procesamiento y análisis de las líneas sísmicas (Figura 10), muestra que el área de estudio se encuentra entre 531 m debajo del nivel del mar en la esquina suroeste y 1519 m por debajo del nivel del mar en la esquina noreste del volumen sísmico, determinado por la conversión de las líneas sísmicas de doble tiempo de viaje (TWT) a metros. Esta secuencia se profundiza de SW a NE y se ve interrumpido por el volcanismo de lodo ubicado principalmente en el lado noroeste (Figura 10D).

El mapa de superficie presenta una serie de paleocanales submarinos que tienen dirección SE-NW (Figura 10A, 10B, 10C). Los paleocanales ubicados en el lado este del volumen sísmico presentan longitudes que varían entre 15 a 20 km. Según Romero (2009) y Cadena y Slatt (2013) las facies sedimentarias son interpretadas como depósitos de aguas profundas del abanico submarino del Magdalena, que pudieron migrar desde el SW durante este tiempo, aunque la dirección de los paleocanales nos puede indicar un posible canal de aguas profundas que fluye en dirección SE-NW.

El mapa de superficie (Figura 10) y espesores (Figura 11) nos muestran los cambios de espesor presentes en la secuencia, así mismo la existencia de tres depocentros A, B y C con espesores de ~400 m, ~350 m y ~320 m respectivamente, lo que significa que es estas son las áreas de depositación de mayor espesor de la cuenca.

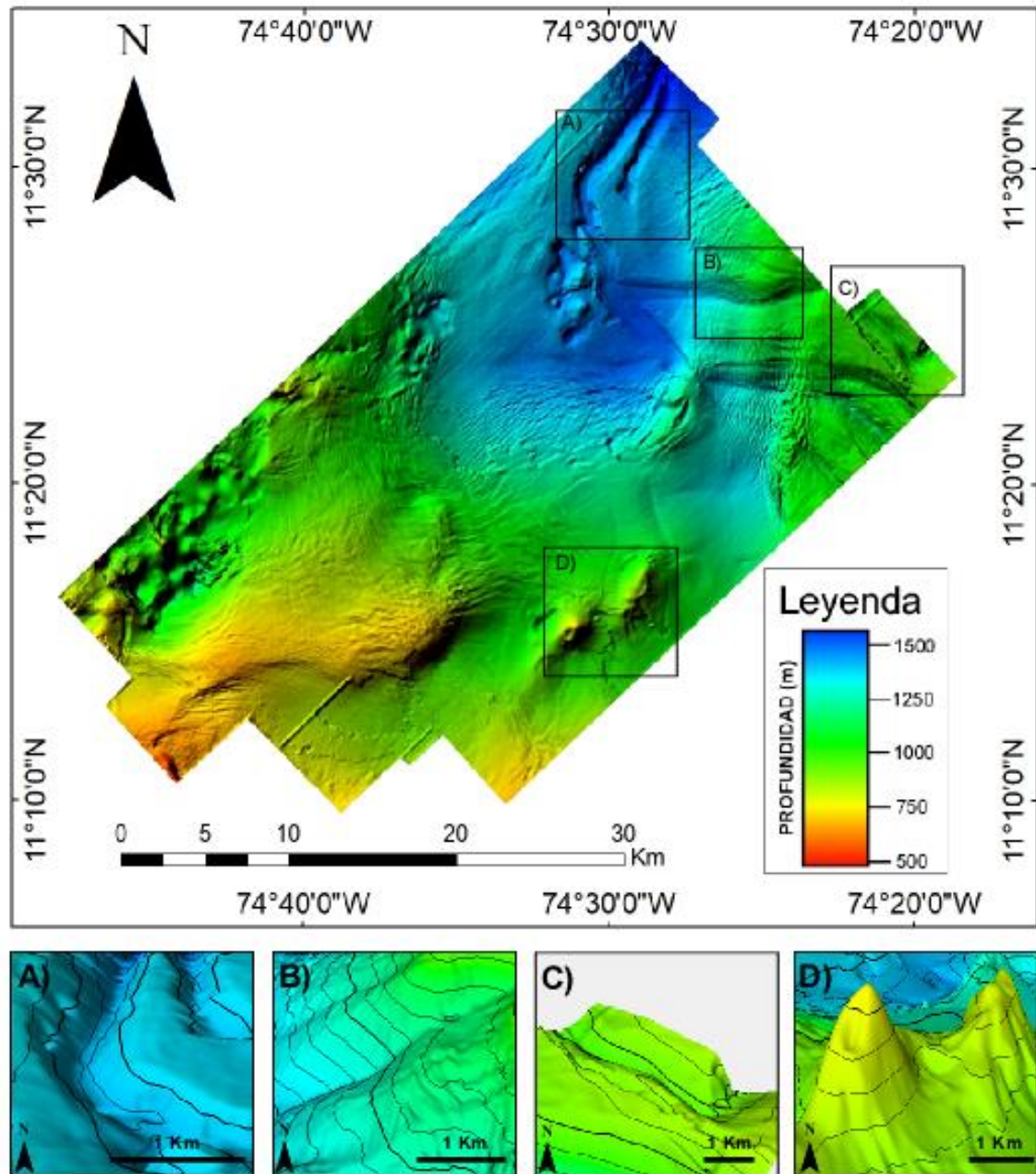


Figura 10. Superficie interpretada de la base del Cuaternario y las geoformas identificadas. A) Serie de paleocanales en dirección SE-NW; B) Paleocanales en dirección SE-NW; C) Paleocanal en dirección SE-NW; D) Diapirismo de lodo en la base de la secuencia del Cuaternario.

En la Figura 12, se observa una línea compuesta orientada SW-NE en la que se pueden identificar facies sísmicas caóticas que interrumpen las facies plano-parallelas que nos indican un movimiento sincinemático generado por la presencia de un diapiro de lodo, estos diapiros deforman la secuencia sedimentaria suprayacente, incluido el afloramiento de depósitos más reciente en el fondo marino. Además, en el sector NE se aprecian fallas normales, generadas por el levantamiento de un anticlinal preexistente.

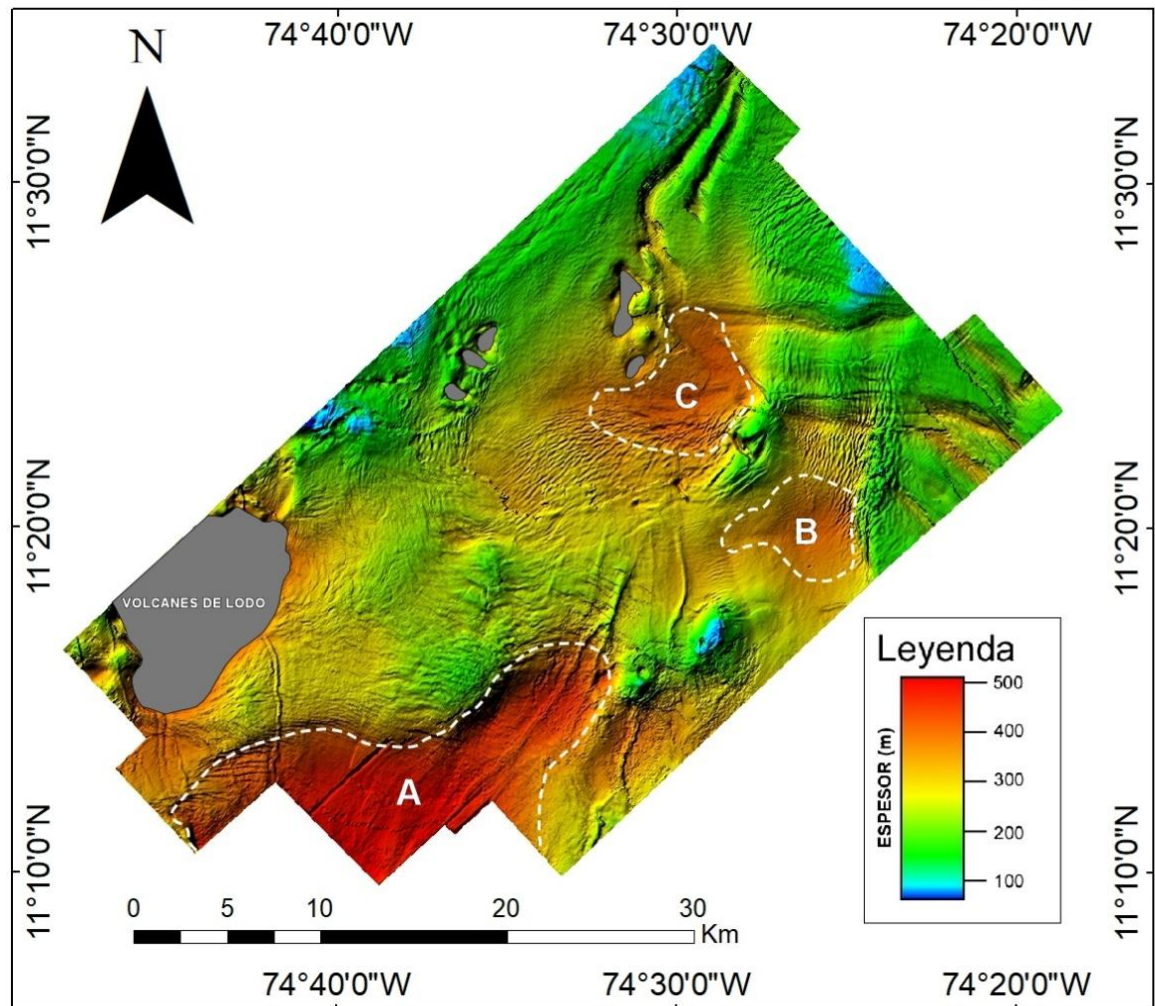


Figura 11. Mapa de espesor de la secuencia del Cuaternario (los colores rojizos son las áreas de mayor espesor) y los depocentros principales identificados en la cuenca Bahía.

Asimismo, se puede apreciar los depocentros A y B y notar como estos parecen estar controlados por estructuras preexistentes. Por otro lado, en la figura 13, se observa otra línea compuesta orientada SW-NE en la que de izquierda a derecha se pueden apreciar varias estructuras como volcanes de lodo que deforman el suelo oceánico, el depocentro C, fallas de colapso gravitacional, fallas normales y paleocanales.

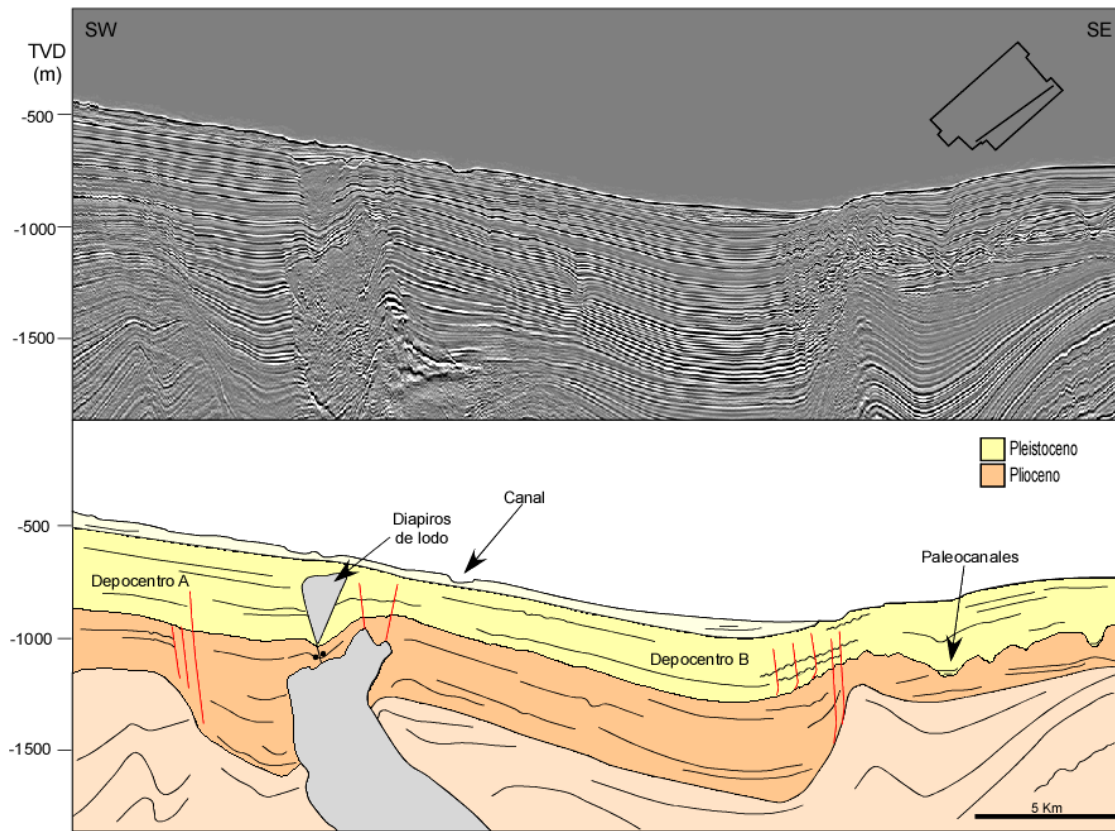


Figura 12. Sección sísmica SW-NE indicando los depocentros A y B y las estructuras principales (diapiros y fallas normales). Se puede notar como los depocentros parecen estar controlados por estructuras preexistentes, como el anticlinal ubicado en el SE de la línea sísmica.

Adicionalmente, en el volumen sísmico se identificaron varios eventos deposicionales inferiores a los del Pleistoceno, identificadas en las Figuras 12 y 13 de

color naranja de edad Plioceno. En el suroeste, la secuencia se ve afectada por fallas de colapso con despegue en la base del Pleistoceno, estas estructuras están ligadas a la falla D. Así mismo, se aprecian pliegues de edad Plioceno-Pleistoceno orientados paralelamente a la falla (Figura 12). En esta zona, se presentan altas pendientes relacionadas con esta misma falla, estas áreas elevadas son atravesadas por un sistema de canales en dirección SE al NW. Este tipo de fallas también son frecuentes en el área central de la zona de estudio, pero con orientación NE-SW.

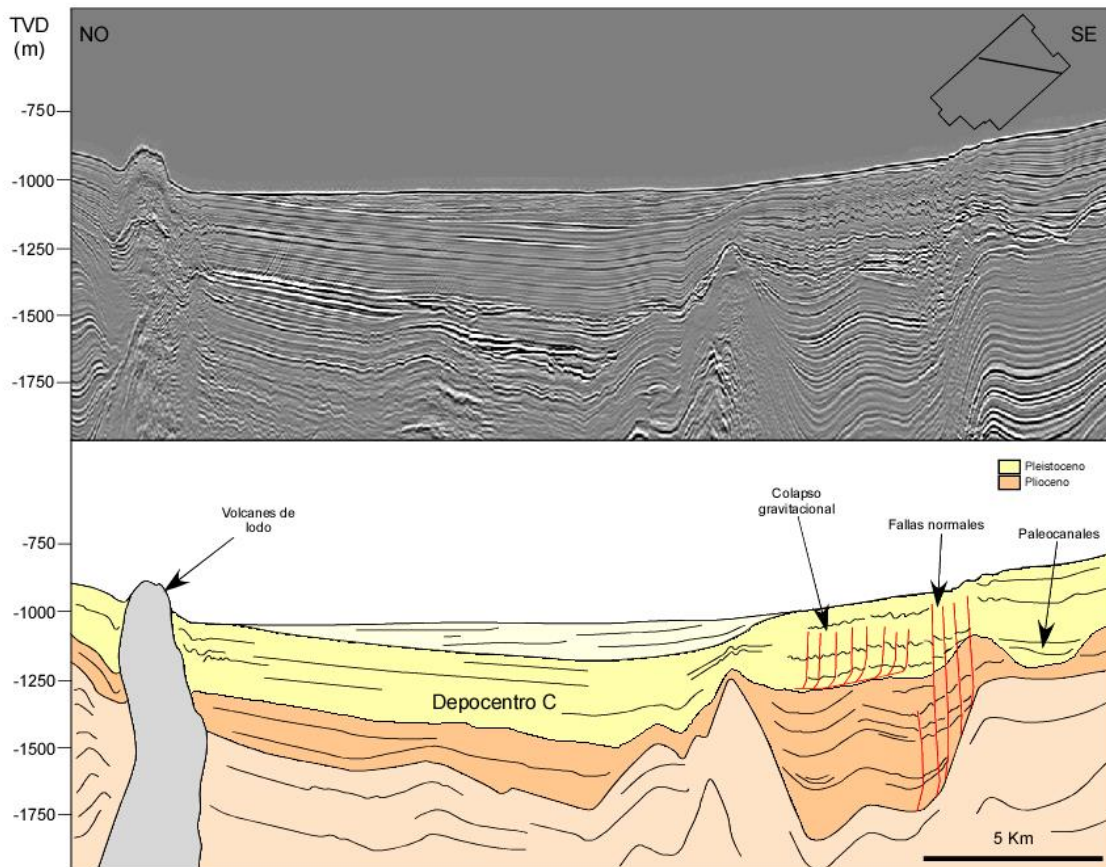


Figura 13. Sección sísmica SW-NE indicando los depocentros C y las estructuras principales (volcanes de lodo, fallas normales y de colapso gravitacional y paleocanales). Se puede notar como los depocentros parecen estar controlados por estructuras preexistentes

Finalmente, la base del Cuaternario presenta pendientes suaves, entre 0° a 6° mayoritariamente, aunque en áreas cercanas a fallas, pliegues y volcanes de lodo evidencias cambios abruptos de pendientes que pueden llegar hasta los 55° .

4.2.DESLIZAMIENTOS SUBMARINOS

Los deslizamientos submarinos son eventos que ocurren principalmente en ambientes donde los materiales geológicos débiles, como sedimentos de grano fino se depositan rápidamente y además están sujetos a una fuerte actividad tectónica (Hampton, 1996). Aunque otros factores como cercanía a fallas, litología, diapirismo pueden aumentar la posibilidad de ocurrencia de estos fenómenos geológicos y si involucran grandes cantidades de material pueden moverse a gran distancia afectando obras de ingeniería costera y comunidades aledañas (McAdoo y Watts, 2004).

4.3.MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

Se utilizó un método basado en sistemas de información geográfica para caracterizar la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos del fondo marino teniendo como base los trabajos realizados por León y Somoza (2011) y Ayalew y Yamagishi (2005). Según los datos obtenidos, el área se dividió en 5 niveles de susceptibilidad a deslizamientos teniendo como principales factores el ángulo de pendiente, presencia de diapirismo y cercanía a fallas.

4.3.1. Análisis de la pendiente

El ángulo de inclinación se usa con mucha frecuencia en estudios de susceptibilidad a deslizamientos. Es un factor que describe la predisposición geométrica a las inestabilidades gravitacionales de la pila de sedimentos. Los deslizamientos de tierra submarinos ocurren principalmente en un cierto ángulo crítico de pendiente y es un factor

que describe la predisposición geométrica a las inestabilidades gravitacionales de la pila de sedimentos. (León y Somoza, 2011). El mapa de factores de la pendiente se dividió en cinco clases (Tabla 1) de muy bajo a muy alto teniendo en cuenta la clasificación utilizada por Ayalew y Yamagishi (2005). En el área de estudio, la mayoría de las pendientes se concentran en un rango de 0° a 4° , aunque pueden alcanzar los 30° relacionados con la presencia de fallas, canales o diapiros (Figura 14).

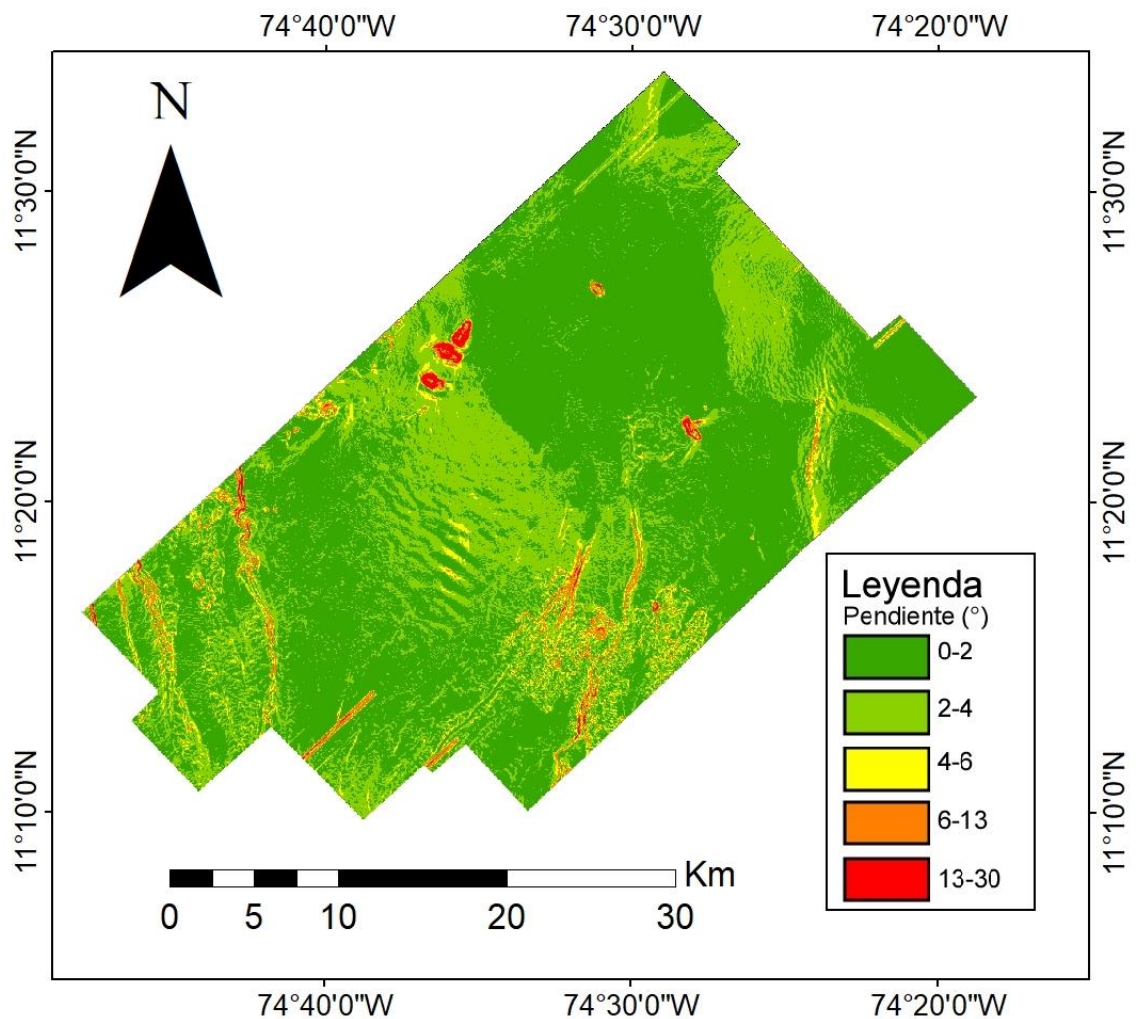


Figura 14. Mapa de pendientes. Se observa que el área de estudio tiene pendientes principalmente entre 0° y 2° y presenta cambios abruptos en zonas cercanas a volcanes de lodo y canales.

Tabla 1. Niveles de susceptibilidad a deslizamiento según ángulo de pendiente, tomado de Ayalew y Yamagishi (2005).

Nivel de susceptibilidad	Pendiente (°)
Muy bajo	0-3
Bajo	4-15
Medio	16-30
Alto	31-45
Muy Alto	46-68

4.3.2. Presencia de diapiros

Los diapiros de lodo son intrusiones en la secuencia suprayacente que por lo general pueden causar deformaciones de sedimentos poco profundos causando desestabilización en la superficie, que puede afectar las instalaciones del fondo marino y pueden provocar deslizamientos (Camargo, 2019). El mapa del factor "ocurrencia de diapiros" contiene solo dos clases presencia o ausencia de diapiros y esto aumenta el grado de susceptibilidad a deslizamiento de cualquier área independientemente de su pendiente.

4.3.3. Cercanía a fallas

Las fallas suelen ser desencadenantes de inestabilidad gravitacional y afectar el suelo marino. La cercanía a fallas aumenta el nivel de susceptibilidad sin importar el ángulo de la pendiente. Teniendo en cuenta el trabajo de León y Somoza (2011) se

seleccionó un área de influencia de 1500 m y se tuvieron en cuenta dos clases: dentro o fuera del área de influencia.

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos submarinos (Figura 15) muestra que el área de estudio en general presenta una susceptibilidad muy baja la ocurrencia de deslizamientos de aproximadamente 55% del total del área estudiada, sin embargo, de acuerdo con el mapa obtenido hay una susceptibilidad baja del 40.3%, una susceptibilidad media del 3.8% y una susceptibilidad alta de 0.82%.

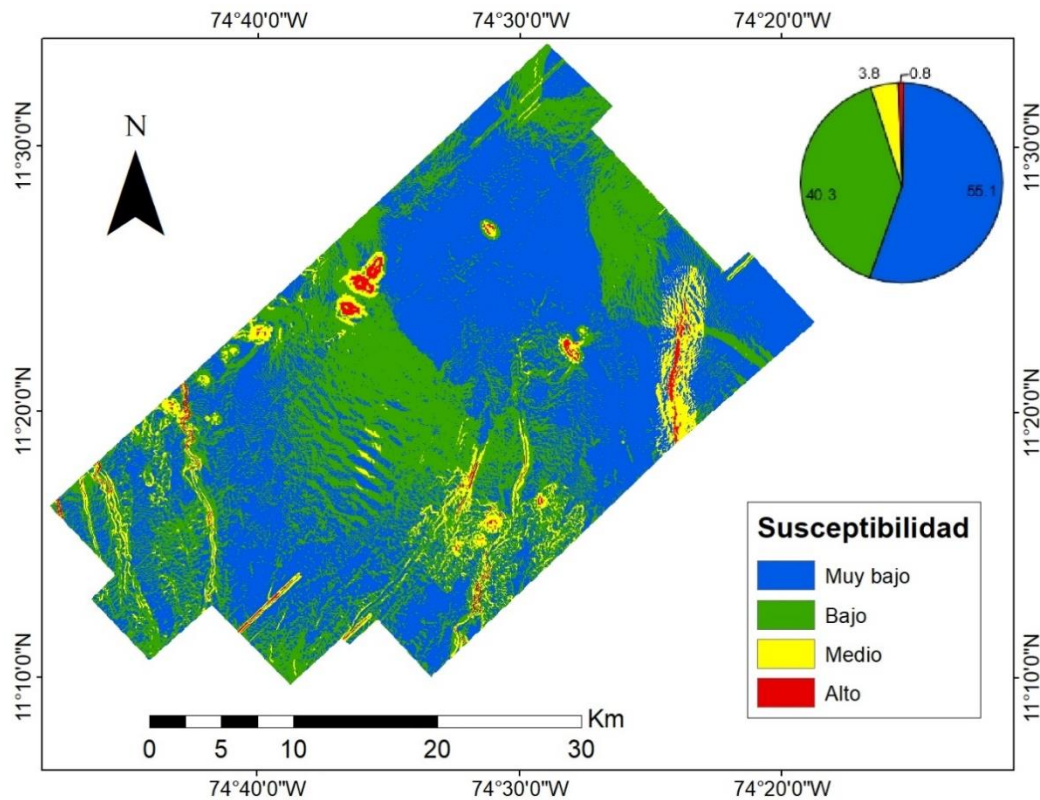


Figura 15. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos submarinos. Se aprecia que la mayor parte del área (colores azules) posee una muy baja susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos.

Las áreas de mayor susceptibilidad se concentran alrededor de los diapiros y las zonas de fallas que a su vez son las áreas con mayor pendiente. Además, se pueden identificar tres zonas diferentes donde la susceptibilidad es de moderada a alta. La primera se encuentra sobre los diapiros que se encuentran al norte del volumen sísmico, en esta área la susceptibilidad parece estar relacionada solo con el factor del ángulo de pendiente y la presencia de diapirismo en la zona. La segunda área se encuentra en el suroeste, al parecer las pendientes generadas por los canales, la presencia de diapirismo y cercanía a fallas aumenta notoriamente la susceptibilidad de deslizamientos en esta zona. Y, por último, la alta susceptibilidad de la zona ubicada al sureste parece estar controlada por la proximidad a las fallas y a los pliegues paralelos a esta.

5. DISCUSIÓN

Las características batimétricas más prominentes en el área de estudio son los canales y los volcanes de lodos. Los canales presentan una dirección SW-NE, y pueden estar asociados a los cañones que transportan sedimentos desde el delta magdalena hasta las cuencas cercanas. Adicionalmente, la gran mayoría de los volcanes de lodo se concentran en la zona noroeste de la cuenca, alineados o cerca de la falla A, lo que sugiere que los fluidos sobrepresionados que conforman estos volcanes se liberaron a lo largo de esta falla. Los diapiros de lodo que aparecen en la base del Cuaternario, pero no llegan hasta la superficie indica una larga historia de movilización de lodo y fluidos en el área. Adicionalmente, la falla D, ubicada en el este de la cuenca es interpretada por algunos autores como la extensión norte del sistema de fallas Santa Marta-Bucaramanga (Galindo, 2016).

Por otro lado, el mapa de espesores nos sugiere la existencia de tres depocentros. El depocentro A esta ubicado en la esquina suroeste de la cuenca, muestra un área gruesa de entre 350 a 475 m de espesor y es interpretada como la reciente deposición del abanico de Magdalena (Figura 11). El depocentro B, se encuentra en el sureste con un espesor de ~350 m presenta una alineación S-N, este depocentro está controlado por la falla D. Finalmente, el depocentro C presenta un espesor de 320 m aproximadamente, y está controlado por la falla B. Estos depocentros son afectados y controlados por estructuras preexistentes que continúan evolucionando generando espacios de acomodación que causan los cambios de espesores en la cuenca.

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos submarinos obtenido teniendo en cuenta: pendiente, presencia de diapirismo y cercanía a fallas muestra que en general la susceptibilidad a deslizamientos en el área de estudio es baja, aunque se reconocen tres áreas con susceptibilidad de media alta ligada a la presencia de los tres factores.

En toda el área de estudio, los deslizamientos muestran una alta sensibilidad al ángulo de inclinación del fondo marino, esto nos indica que es el desencadenante principal de estos, como lo sugieren algunos autores (Mulder, 2009; Faugères, 1997). Sin embargo, no hay que desconocer que muchos de los deslizamientos tienen como principales factores de activación las altas tasas de sedimentación, sobrepresurización, filtraciones de fluidos, diapirismo, fallas, entre otros. En el área de estudio los sedimentos que han sido depositados recientemente pueden comportarse como planos de deslizamiento. En este caso, es preciso contar con información adicional del área tales como la tasa de depositación, análisis de facies calibradas a pozos, el mapa de susceptibilidad podría cambiar y tal vez las pendientes dejen de ser el principal factor desencadenante de estos en el área, ya que de hecho algunos autores sugieren que la mayoría de los deslizamientos submarinos ocurren en pendientes entre 0° y 5° (Masson et al., 2006; Hühnerbach et al. 2004).

6. CONCLUSIONES

La cuenca de Bahía se encuentra ubicada en la parte superior del talud continental, en una zona geológicamente compleja producto de la subducción de la placa Caribe bajo la Suramericana, caracterizada por el gran aporte de sedimentos provenientes de la desembocadura del río Magdalena que se encuentra al suroeste de la cuenca, lo que la convierte en una zona propicia para la ocurrencia de deslizamientos submarinos que si son lo suficientemente grandes pueden convertirse en geoamenazas tanto para la infraestructura costera y marina, como para las poblaciones aledañas.

Por otro lado, la evaluación de susceptibilidad define la probabilidad de ocurrencia de un proceso geológico como el colapso del fondo marino, el escape de fluidos, entre otros. El método propuesto es una herramienta ventajosa para mapear geoamenazas en estudios regionales como primer enfoque en la evaluación de riesgos geológicos. La generación del mapa de susceptibilidad a deslizamientos a partir del análisis de datos sísmicos y uso de sistema de información geográfica es un gran paso en el manejo de riesgos en esta zona, aunque solo se tuvieron en cuenta tres criterios (ángulo de pendiente, presencia de diapiros y cercanía a fallas) este mapa nos proporciona de manera general una idea de las zonas de mayor susceptibilidad a deslizamientos. El mapa de susceptibilidad a deslizamientos submarinos muestra tres áreas geológicas diferentes donde la susceptibilidad es de moderada a alta, relacionados principalmente con el alto ángulo de inclinación del suelo marino. Sin embargo, no hay que desconocer que otros factores como la tasa de sedimentación, sobrepresurización, presencia de fluidos, entre

otros, pueden incrementar la susceptibilidad a deslizamientos en estas zonas, dejando la pendiente de ser el factor principal. Para esto es necesario contar con datos adicionales, como muestreo de pozos, tasas de sedimentación en la zona para mejorar o comprobar los resultados aquí obtenidos.

Finalmente, dado la importancia del estudio de las geoamenazas marinas este tipo de estudio se debería extender a otras áreas del caribe e incluso a la costa pacífica para generar un compendio de información general que pueda servir para futuros prospectos de infraestructura y de planeación territorial del país.

7. REFERENCIAS

Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15–31. doi:10.1016/j.geomorph.2004.06.010

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. and Martínez, J. (2007). Colombian sedimentary basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. ANH, Bogotá.

Cadena, A. F., & Slatt, R. M. (2013). Seismic and sequence stratigraphic interpretation of the area of influence of the Magdalena submarine fan, offshore northern Colombia. *Interpretation*, 1(1), SA53–SA74. doi:10.1190/int-2013-0028.1

Cadena, A. F., Romero, G. & Slatt, R. M. (2015). Application of Stratigraphic Grade Concepts to Understand Basin-fill Processes and Deposits in an Active Margin Setting, Magdalena Submarine Fan and Associated Fold-and-Thrust Belts, Offshore Colombia.

Camargo, J., Silva, M., Ferreira Júnior, A., & Araújo, T. (2019). Marine Geohazards: A Bibliometric-Based Review. *Geosciences*, 9(2), 100. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences9020100>

Cediel, Fabio & Shaw, R.P. & Cáceres, C. (2005). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics. 79. 815-848.

Duarte, L.M., Esteves, C.A., Zalán, P. V., Antolinez, H., & Mosquera, J.C. (2009). Nuevos Conceptos para el Modelo Tectono - Estratigrafico de las Cuencas Sedimentarias en el Occidente del Caribe Colombiano, in X Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP), Cartagena, Colombia, p. 11

Espitia, W. (2016). Cenozoic Deformation in the Bahía area, Colombian Caribbean (Tesis de maestría). Royal Holloway University of London.

Faugères, J. C., Gonthier, E., & Stow, D. A. (1984). Contourite drift molded by deep Mediterranean outflow. *Geology*, 12(5), 296-300.

Galindo, P., and L. Lonergan, (2015). Transtension and transpression in an oblique subduction setting: evolution of the Bahía Basin, Colombian Caribbean margin. Great Britain, Imperial College London.

Galindo, P., and L. Lonergan, (2017). Transpressional inversion in the Bahía Basin, Offshore Santa Marta, Colombian Caribbean margin.

Guerrero, J. (1993). Magnetostratigraphy of the upper part of the Honda Group and Neiva Formation : Miocene uplift of the Colombian Andes: (Tesis de doctorado) University.

Hampton, M. A., Lee, H. J., y Locat, J. (1996). Submarine Landslides, Review of Geophysics, p. 33-59

Hernández, R., & Guerrero, C. (2006). Expresión profunda de dominios oceánico y continental, y propagación de su deformación hacia la cobertera sedimentaria del 'offshore' Caribe., in IX Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP), Cartagena, Colombia, p. 4.

Hoorn, C., Guerrero, J., Sarmiento, G. & Lorente, M. (1995), Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America: Geology, v. 23, p. 237–240.

Hühnerbach V., Masson D. & COSTA project partners. (2004). Landslides in the north Atlantic and its adjacent seas: an analysis of their morphology, setting and behaviour. Mar. Geol. 213, 343–362.

Idárraga-García, J., Masson, D. G., García, J., León, H., & Vargas, C. A. (2019). Architecture and development of the Magdalena Submarine Fan (southwestern Caribbean). Marine Geology, 414, 18-33.

León, R., & Somoza, L. (2011). GIS-based mapping for marine geohazards in seabed fluid leakage areas (Gulf of Cadiz, Spain). Marine Geophysical Research, 32(1-2), 207–223. doi:10.1007/s11001-011-9135-z

Masson, D., Harbitz, C., Wynn, R., Pedersen, G., Lovholt, F. (2006). Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction Phil. Trans. R. Soc. A.3642009–2039

McAdoo, B. G., y Watts, P. (2004). Tsunami hazard from submarine landslides on the Oregon continental slope. Marine Geology, p. 235-245

Mulder, T., Gonthier, E., Lecroart, P., Hanquiez, V., Marches, E., Voisset, M. (2009). Sediment failures and flows in the Gulf of Cadiz (eastern Atlantic). Mar Petrol Geol 26:660–672

Pince, J.M, Osorio, C., Mouly, B., Amaral, J., 2003. Tertiary depositional environments and reservoir properties in the Sinú Accretionary Prism (Offshore e Colombia). In: Memoirs VIII Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, 6 pp.

Pindell, J.L., and Kennan, L., 2009, Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update: Geological Society, London, Special Publications, v. 328, no. 1, p. 1–55, doi: 10.1144/SP328.1.

Ratzov, Gueorgui & Marc, Sosson & Collot, Jean-Yves & Migeon, S. & Michaud, François & Lopez, Eduardo & Gonidec, Y. (2009). Deslizamientos submarinos a lo largo del Margen Convergente del Norte de Ecuador - Sur de Colombia. Posible control tectónico.

Restrepo, J.C., Orejarena A., & Torregroza A.C. (2017). Suspended sediment load in northwestern South America (Colombia): A new view on variability and fluxes into the Caribbean Sea. *Journal of South American Earth Sciences*, 80: 340-352.

Romero, G. (2009) Deepwater sedimentary processes in an active margin, Magdalena submarine fan, offshore Colombia.: University of Oklahoma, PhD Thesis, 322 p.

Romero, G., Slatt, R. & Pirmez, C. (2015). Evolution of the Magdalena deepwater fan in a tectonically active setting, offshore Colombia, in C. Bartolini, and P. Mann, eds., *Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin*, v. 108, AAPG Memoir.

Romero, G.A., Slatt, R.M., & Pirmez, C. (2010). Detached and Shelf-Attached Mass Transport Complexes on the Magdalena Deepwater Fan, in Mosher, D.C., Shipp, R.C., Moscardelli, L., Chaytor, J.D., Baxter, C.D.P., Lee, H.J., and Urgeles, R. eds., *Submarine Mass Movements and Their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Vol. 28, Springer Netherlands, Dordrecht, p. 593–606.

Sarmiento, A. (2019). Stratigraphic analysis of the Bahía intraslope basin, offshore northern Colombia. Tesis de maestría. University of Colorado.

Toto, E. A., & Kellogg, J. N. (1992). Structure of the Sinu-San Jacinto fold belt — an active accretionary prism in northern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(2), 211–222. doi:10.1016/0895-9811(92)90039-2

Vinnels, J., Butler, R., McCaffrey, W., Paton, D. A. (2010). Depositional processes across the Sinú Accretionary Prism, offshore Colombia. *Mar.Pet.Geol.*27(4),794–809.

Yonggang, J., Chaoqi, Z., Liping, L. and Dong, W. (2016), Marine Geohazards: Review and Future Perspective. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 90: 1455-1470. doi:10.1111/1755-6724.12779